

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кожушко Андрій Павлович

УДК 629.1.02

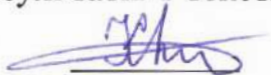
ДИСЕРТАЦІЯ

**ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МЕТОДИ ПОЛПШЕННЯ ПЛАВНОСТІ ХОДУ
КОЛІСНОГО ТРАКТОРА ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ РІДКИХ ВАНТАЖІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори
Галузь знань 13 – механічна інженерія, 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



(підпис)

А.П. Кожушко

(ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант – Кальченко Борис Іванович, Заслужений діяч
науки і техніки України, доктор технічних наук, професор

*Згоден з змістом
з інших примірників
до науковій засвідчую.*
Б.О. Кальченко
секретар
кабри 64.050.13
Владислав Душенко
26.02.2021р.



Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Кожушко А.П. Динамічний аналіз та методи поліпшення плавності ходу колісного трактора при транспортуванні рідких вантажів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.02 «Автомобілі та трактори» (13 Механічна інженерія та 27 Транспорт). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми поліпшення динамічних властивостей руху колісних тракторів при транспортуванні рідини в цистернах сільськогосподарського призначення за рахунок визначення раціональних схем та параметрів конструкції машинно-тракторного агрегату для зменшення негативного впливу низькочастотних коливань поверхневого шару рідини у цистерні на показники плавності ходу трактора.

Аналізуючи існуючі дослідження, які пов'язані з використанням колісних тракторів на транспортних роботах, було встановлено, що виробники тракторної техніки для аграріїв постійно збільшують її продуктивність – це зумовлює до збільшення вантажопідйомність транспортованих агрегатів та підвищення транспортних швидкостей. Така тенденція негативним чином впливає на динамічні властивості руху тракторних цистерн при їх частковому заповненні, яке відбувається в умовах коливального руху багатотонних мас рідини вздовж її вільної поверхні. Не вивченою залишається можливість розповсюдження коливання рідини з цистерни через зчпний пристрій на підресорену частину трактора. Недостатньо висвітлено питання виникнення автоколивань при при прямолінійному русі колісного трактора з цистерною.

Сформульована загальна методика математичного моделювання коливань рідини у тракторній цистерні, яка має вільну поверхню. На основі використання рівняння Нав'є-Стокса для ізотермічного руху ньютонівської

в'язкої нестисливої рідини, а також формули Лапласа для сили поверхневого натягу, формалізовано фізичну модель збудження низькочастотних поверхневих коливань рідини і аналітичні вирази для визначення частот вільних коливань. Запропоновано обчислювати коливальний процес рідини в тракторній цистерні шляхом введення умовних (парціальних) осциляторів, які мають конкретні вагові, інерційні, пружні та дисипативні характеристики. Експериментально доведено доцільність використання математичних алгоритмів, які визначають частоти вільних коливань рідини в ємності, шляхом порівняння теоретичних та експериментальних значень періодів коливань для рідини різної в'язкості. Визначено величини декрементів загасання коливань рідини різної в'язкості задля його використання при подальших розрахунках нелінійної моделі руху рідини в цистерні.

Наведена концепція визначення вільних коливань колісного трактора з цистернами на транспортних роботах. Представлено лінеарізовану модель пов'язаних поздовжніх коливань колісного трактора з причіпною та напівпричіпною цистернами. Модель дозволяє знайти спектр наявних частот вільних механічних коливань у низькочастотному діапазоні, а також проаналізувати форми взаємопов'язаних рухів елементів, амплітуди яких нормовані за їх вкладом до загальної кінетичної енергії коливань. За допомогою проведеного динамічного аналізу помічено виникнення динамічної нестійкості (галопуючого резонансу причіпної цистерни). Відкриті нові спектральні ефекти, що дозволяють розвинути класичну теорію коливань та підняти ефективність її прикладних методів за рахунок швидкого визначення небезпечних та найбільш напружених режимів роботи агрегату. За результатами аналізу частот вільних коливань виконане структурне укрупнення математичної моделі машинно-тракторного агрегату.

Сформовано нелінійну математичну модель пов'язаних коливань колісного трактора з причіпною та напівпричіпною цистернами. Модель дозволяє досліджувати вплив перерозподілу мас рідини на техніко-експлуатаційні показники колісного трактора при виконанні транспортної

роботи з перевезення рідкого вантажу. Запропоновано для математичного тестування динамічних якостей транспортного засобу описувати нерівності дорожнього покриття двома гармоніками, які мають, відповідно, велику (у діапазоні декількох сотень метрів) та малу (у діапазоні декількох метрів) довжину хвилі. Розроблено метод визначення довжини хвилі дорожнього покриття, яка призводить до резонансного збільшення амплітуди коливань рідини у цистерні, що впливає на динамічні властивості колісного трактора.

Проведено експериментальне дослідження з метою підтвердження теоретичних залежностей, які описують динаміку поздовжньо-кутового та вертикального руху колісного трактора з причіпною та напівпричіпною цистернами при виконанні транспортної роботи. Виконано дослідження рівнів прискорень на сидінні оператора-водія колісного трактора при перевезенні рідких вантажів з різним рівнем наповнення цистерн, на основі яких встановлено передумови до повного аналізу низькочастотних коливань шляхом дослідження плавності ходу колісного трактора з цистерною.

Встановлено взаємозв'язок між рівнем наповнюваності цистерни та показником плавності ходу колісного трактора. А саме, при малих рівнях рідини вертикальні прискорення на сидінні оператора-водія в резонансній зоні напівпричіпного агрегату змінюються за ступеневою функцією до моменту вирівнювання мас між трактором та цистерною. При співпаданні мас агрегату та трактора резонансна зона напівпричіпного агрегату входить в резонансну зону остова трактора. Значний вплив на показник плавності ходу колісного трактора при транспортуванні цистерни здійснюють шини трактора і напівпричіпного агрегату. При зниженні тиску в шинах трактора досягається зменшення вертикальних прискорень в резонансних зонах переднього моста та остова трактора. А при зниженні тиску в шинах напівпричіпного агрегату відповідне зменшення вертикальних прискорень спостерігається в усіх резонансних зонах машинно-тракторного агрегату.

Ключові слова: трактор колісний, цистерна, роботи транспортні, коливання, вільна поверхня рідини, динаміка руху, плавність ходу, динамічні

навантаження, ходова система.

Список публікацій здобувача:

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кожушко А.П. Підхід до визначення завантаженості трансмісії колісного трактора при впливі нерівностей поверхні / Б.І. Кальченко, І.С. Чернявський, А.П. Кожушко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2017. – № 8. – С. 49–54.

2. Кожушко А.П. Вплив плавності ходу колісних тракторів на навантаженість трансмісії / Б.І. Кальченко, О.Ю. Ребров, А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2017. – №41. – С. 30–37.

3. Кожушко А.П. Оцінка плавності руху самохідної машини при впливі нерівностей поверхні / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко, А.Р. Кісельов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30(1252).–С.56–63.

4. Кожушко А.П. Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ«ХПІ», 2017. – № 44(1266). – С. 110–115.

5. Кожушко А.П. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею/ А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – №3(1279). – С. 41–51.

6. Кожушко А.П. Методологічні засади створення сімейства тракторів загального призначення / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2018. – №42. – С. 53–60.

7. Плавність руху як складова динаміки трактора: монографія / Б.І. Кальченко, О.Ю. Ребров, А.П. Кожушко, А.Г. Мамонтов –Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 164 с.

8. Кожушко А.П. Моделювання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 27(1303).– С. 34–61.

9. Кожушко А.П. Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 5(1330). – С. 34–40.

10. Кожушко А.П. Оцінка енергетичної складової транспортного засобу з агрегатами перемінної маси за рахунок динамічного аналізу вільних коливань / А.П. Кожушко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – № 201. – С. 217 – 228.

11. Кожушко А.П. Дослідження плавності руху машинно-тракторного агрегату з перемінною масою при виконанні транспортної роботи / А.П. Кожушко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2019. – № 15. – С. 50–57.

12. Кожушко А.П. Спектральні ефекти та теореми про властивості пучка симетричних матриць в задачах динаміки складних механічних систем / А.П. Кожушко, О.О. Набока, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 8(1333). – С. 214–223.

13. Kozhushko A.P. Mathematical modeling of free liquid surface motion in transporting agricultural semitrailer tanks / A.P. Kozhushko, A.L. Grigoriev,

В.І. Kalchenko // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ«ХПІ», 2019. – № 22(1347). – С. 31–38.

14. Кожушко А.П. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом / А.Г. Мамонтов, А.П. Кожушко, О.Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ«ХПІ», 2019. – №1. – С. 29–41.

15. Кожушко А.П. Енергетичність системи машинно-тракторного агрегату з перемінною масою за сталого руху / А.П. Кожушко // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Сер. :Технічні науки». – Київ, 2019. – Т. 30 (69). – Ч. 2.– №3. – С. 161–166.

16. Кожушко А.П. Шляхи зменшення впливу поздовжніх коливань транспортного засобу з агрегатами перемінної маси / А.П. Кожушко, С.С. Кравченко, А.Г. Мамонтов, О.О. Болжаларський // Двигатели внутреннего сгорания. – Харків: НТУ«ХПІ», 2019. – № 2. – С. 59–65.

17. Кожушко А.П. Методика експериментального дослідження визначення динамічних характеристик при русі колісних тракторів з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко, І.В. Колеснік, В.В. Лупенко // Наукове видання Державного університету «Житомирська Політехніка». Технічна інженерія. – Житомир, 2019. – № 2(84). – С. 21–28.

18. Кожушко А.П. Спектральний аналіз експериментальних даних руху колісних тракторів з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки». – Київ, 2019. – Т. 30(69). – Ч.2. – №5. – С. 134–143.

19. Кожушко А.П. Дослідження динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Проблеми надійності машин. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – № 205. – С. 159–172.

20. Кожушко А.П. Експериментальні дослідження ергономічних властивостей колісних тракторів з агрегатами змінної маси /А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2019. – №45. – С. 38–45.

21. Кожушко А.П. Аналіз впливу коливань рідкого вантажу в напівпричіпній цистерні на показники руху колісного трактора / А.П. Кожушко, О.Ю. Ребров, Б.І. Кальченко, А.Г. Мамонтов // Scientific Journal «ScienceRise». – 2019. – № 12(65). – С. 16–19.

22. Кожушко А.П. Дослідження малих поперечних коливань агрегатів змінної маси / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – № 1(1355). – С. 33–43.

23. Kozhushko A. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhushko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy, E. Kalinin, E. Holovina // «EUREKA: Physics and Engineering». – 2020. – № 4. – P. 90–100.

24. Кожушко А.П. Вплив перемінної маси рідкого вантажу на динамічну навантаженість ходової системи транспортованих агрегатів / А.П. Кожушко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2020. – № 21. – С. 75–86.

25. Кожушко А.П. Основні принципи математичного моделювання динаміки транспортування рідкого вантажу та дослідження на параметричний резонанс в умовах перерозподілу мас в цистерні / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Динаміка і міцність машин. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – № 1. – С. 13–30.

26. Кожушко А.П. Аналіз впливу параметричного резонансу на рух тракторної цистерни при транспортуванні рідкого вантажу / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Динаміка і міцність машин. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – №2. – С. 57–66.

27. Кожушко А.П. Експериментальне та розрахункове дослідження затухань коливань рідини в ємності з вільною поверхнею / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – № 1. – С. 24–43.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

28. Кожушко А.П. Визначення складових сил, які діють на платформу цистерни машинно-тракторного агрегату /А.П. Кожушко// Wykonane na materiałach Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Science, research, development #11.Technics and technology», Rotterdam (The Netherlands), 29.11.–30.11.2018. – Warszawa : Sp. Zo.o. «Diamond trading tour», 2018.– P.55–58.

29. Кожушко А.П. Математичне моделювання транспортної роботи машинно-тракторним агрегатом в умовах перерозподілу мас в цистерні / А.П. Кожушко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVII міжнар. науково-практич. конф. MicroCAD-2019, 15-17 травня 2019 р.: тези доп. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – Ч.1. – С. 65.

30. Кожушко А.П. Математичне моделювання руху вільної поверхні рідини в сільськогосподарських цистернах / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Математичне та імітаційне моделювання систем: Чотирнадцятої міжнар. науково-практич. конф. МОДС 2019, 24-26 червня 2019 р. : тези доп. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – С. 102–105.

31. Кожушко А.П. Особливості виконання транспортних робіт причіпними та напівпричіпними агрегатами у складі машинно-тракторної техніки / А.П. Кожушко, А.Г. Мамонтов // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація», 16-17 травня 2019 р.: тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2019. – С. 125.

32. Кожушко А.П. Статистичний аналіз експериментальних даних при виконанні транспортної роботи трактором з цистерною / А.П. Кожушко //

International scientific and practical conference «Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience» Wloclawek, Republic of Poland, 27 – 28 September 2019. – Riga : Baltija Publishing, 2019. – P. 158–162.

33. Кожушко А.П. Динамічна навантаженість ходової системи колісного трактора з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Збірник матеріалів міжнар. науково-методич.конф. «Проблеми надійності машин», присвячена пам'яті академіка В.Я. Аніловича, 12-13 листопада 2019 р. : тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2019. – С. 51.

34. Kozhushko A., Riezva K. Comparison a running smoothness of a wheeled tractor with a semitrailer tank or unit while driving on asphalt-concrete surface / A. Kozhushko, K. Riezva // Proceedings of the 3rd annual conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions», 23 November 2019. – Talinn, Estonia, 2019. – P. 39–41.

35. Кожушко А.П. Передумови до виникнення параметричного резонансу колісного трактора при транспортуванні агрегатів перемінної маси / А.П. Кожушко // Матеріали міжнар. науково-практич.конф. «Експлуатаційна та сервісна інженерія», 15-16 жовтня 2020 р. : тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2020. – С. 101–102.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

36. Кожушко А.П. Розвиток математичної моделі криволінійного руху двовісного автомобіля / Б.І. Кальченко, О.В.Головіна, А.П. Кожушко, С.В. Редчиць // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 13(1235). – С. 45–50.

37. Коливання механічних систем в автомобіле- та тракторобудуванні: навчальний посібник / А.П. Кожушко. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 316 с.

38. Кожушко А.П. Дослідження процесу розгону машинно-тракторного агрегату з гідрокерованою трансмісією при виконанні транспортної роботи / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко, Є.С. Пелипенко, О.О. Ярита // Вісник

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків: ХНАДУ. – 2019. – № 85. – С. 14–21.

39. Патент України на корисну модель 136382, МПК (2019.01), В 60 К 17/00. Трансмiсія транспортного засобу / А.П. Кожушко, Б.І. Кальченко; заявник та патентообладач НТУ «ХПІ» (Україна). – № и 2019 02822; заявл.21.03. 2019; опубл.12.08.2019, Бюл. № 15.

40. Патент України на корисну модель 138508, МПК (2019.01), F 02 D 41/10. Спосiб мiкроконтролерного регулювання частоти обертання колiнчастого вала дизеля / А.О. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.С. Таланiн, С.Ю. Бiлик, А.П. Кожушко, I.В. Шуба; заявник та патентообладач А.О. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.С. Таланiн, С.Ю. Бiлик, А.П. Кожушко, I.В. Шуба (Україна). – № и 2019 06158; заявл.03.06.2019; опубл.25.11.2019, Бюл. № 22.

ABSTRACT

Kozhushko A.P. Dynamic analysis and methods to improve the smoothness of the wheeled tractor when transporting liquid cargo. – Manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.22.02 "Cars and tractors" (13 Mechanical Engineering and 27 Transport). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and applied problem of improving the dynamic properties of the movement of tractors when transporting liquid in agricultural tanks by determining rational schemes and design parameters of the machine-tractor unit to reduce the negative effect of low-frequency oscillations of the surface layer of the liquid in the tank on the indicators of the smoothness of the tractor.

Analyzing the existing research related to the use of tractors in transport operations, it was found that manufacturers of tractor equipment for farmers are constantly increasing its productivity - this leads to an increase in the carrying

capacity of the transported units and an increase in transport speeds. This trend negatively affects the dynamic properties of the movement of tractor tanks when they are partially filled, which occurs under conditions of oscillatory movement of multi-ton masses of liquid along its free surface. The possibility of the propagation of the oscillation of the liquid from the tank through the coupling device to the sprung part of the tractor remains unexplored. The issues of the occurrence of self-oscillations during the rectilinear movement of a wheeled tractor with a tank are not sufficiently covered.

A general method of mathematical modeling of fluid oscillations in a tractor tank, which has a free surface, is formulated. Based on the use of the Navier-Stokes equation for the isothermal motion of a Newtonian viscous incompressible fluid, as well as the Laplace formula for the surface tension force, a physical model of the excitation of low-frequency surface oscillations of a fluid and analytical expressions for determining the frequencies of free oscillations are formalized. It is proposed to calculate the oscillatory process of a liquid in a tractor tank by introducing conditional (partial) oscillators, which have specific weight, inertial, elastic and dissipative characteristics. The expediency of using mathematical algorithms that determine the frequencies of free oscillations of a liquid in a container by comparing the theoretical and experimental values of the periods of oscillations for a liquid of different viscosity has been experimentally proved. The values of damping decrements of fluid oscillations of different viscosity are determined for its use in further calculations of a nonlinear model of fluid movement in a tank.

The given concept of determining the free vibrations of a wheeled tractor with tanks during transport operations. Linearized model of coupled longitudinal vibrations of a wheeled tractor with trailed and semi-trailed tanks is presented. The model makes it possible to find the spectrum of available frequencies of free vibrations in the low-frequency range, as well as to analyze the forms of interrelated movements of elements, the amplitudes of which are normalized by their contribution to the total kinetic energy of vibrations. With the help of the

performed dynamic analysis, the appearance of dynamic instability (galloping resonance of a trailed tank car) was noticed. New spectral effects have been discovered that make it possible to develop the classical theory of oscillations and increase the efficiency of its applied methods by quickly identifying the most dangerous and most stressful operating modes of the unit. Based on the results of the analysis of the frequencies of free vibrations, the structural enlargement of the mathematical model of the machine-tractor unit was carried out.

A nonlinear mathematical model of coupled oscillations of a wheeled tractor with trailed and semi-trailed tanks has been formed. The model makes it possible to study the effect of the redistribution of liquid masses on the technical and operational indicators of a wheeled tractor when performing transport work for the transportation of liquid cargo. It is proposed for mathematical testing of the dynamic properties of a vehicle to describe the irregularities of the road surface by two harmonics, which have, respectively, large (in the range of several hundred meters) and small (in the range of several meters) wavelength. A method has been developed for determining the wavelength of the road surface, which leads to a resonant increase in the amplitude of fluid oscillations in the tank, which affects the dynamic properties of a wheeled tractor.

An experimental study was carried out to confirm the theoretical relationships describing the dynamics of the longitudinal-angular and vertical movement of a wheeled tractor with trailed and semi-trailed tanks when performing transport work. Studies of the levels of acceleration on the driver's seat of a wheeled tractor during the transportation of liquid cargo with different levels of filling of tanks were carried out, on the basis of which the prerequisites for a complete analysis of low-frequency oscillations were established by studying the smoothness of the wheel tractor with a tank.

The relationship between the level of filling of the tank and the indicator of the smoothness of the wheel tractor is established. In particular, at low liquid levels, the vertical accelerations on the driver's seat in the resonance zone of the semitrailer unit change according to a power function until the masses are

equalized between tractor and tank. When the masses of the unit and the tractor coincide, the resonance zone of the semitrailer unit enters the resonance zone of the tractor frame. A significant influence on the indicator of the smoothness of the wheel tractor during the transportation of the tank is carried out by the tires of the tractor and the semitrailer unit. With a decrease in the pressure in the tires of the tractor, a decrease in vertical accelerations in the resonance zones of the front axle and the tractor frame is achieved. And with a decrease in the pressure in the tires of the semitrailer unit, a corresponding decrease in vertical acceleration is observed in all resonance zones of the machine-tractor unit.

Key words: tractor, transport works, oscillations, dynamics of movement, smoothness of course, concept, measurements, methodology.

Publication list of candidate for a degree:

1. Kalchenko B.I. Pidkhyd do vyznachennia zavantazhenosti transmisii kolisnogo traktora pry vplyvi nerivnostei poverkhni / B.I. Kalchenko, I.S. Cherniavskiy, A.P. Kozhushko // *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnogo kompleksiv*. – 2017. – № 8. – P. 49 – 54.

2. Kalchenko B.I. Vplyv plavnosti khodu kolisnykh traktoriv na navantazhenist transmisii / B.I. Kalchenko, O.Yu. Rebrov, A.P. Kozhushko // *Avtomobilnyi transport*. – 2017. – № 41. – P. 30–37.

3. Kalchenko B.I. Otsinka plavnosti rukhu samokhidnoi mashyny pry vplyvi nerivnostei poverkhni / B.I. Kalchenko, A.P. Kozhushko, A.R. Kiselov // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 30 (1252). – P. 56 – 63.

4. Kalchenko B.I. Doslidzhennia dynamichnoi stiikosti ta plavnosti rukhu kolisnykh traktoriv / B.I. Kalchenko, A.P. Kozhushko // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Mekhaniko-tekhnolohichni systemy ta kompleksy*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 44 (1266). – P. 110 – 115.

5. Kozhushko A.P. Matematychni modeliuvannia nyzkochastotnykh kolyvan viazkoi ridyny v horyzontalnii yemnosti z vilnoi poverkhnei / A.P.

Kozhushko, O.L. Hryhoriev // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – № 3 (1279). – P. 41 – 51.

6. Kalchenko B.I. Metodolohichni zasady stvorennia simeistva traktoriv zahalnoho pryznachennia / B.I. Kalchenko, A.P. Kozhushko // *Avtomobilnyi transport.* – 2018. – № 42. – P. 53 – 60.

7. Kalchenko B.I. Plavnist rukhu yak skladova dynamiky traktora: monohrafiia / B.I. Kalchenko, O.Yu. Rebrov, A.P. Kozhushko, A.H. Mamontov – Kharkiv: FOP Panov A.M., 2018. – 164 p.

8. Kozhushko A.P. Modeliuvannia poviazanykh kolyvan kolisnoho traktora ta tsysterny z ridynoiu na priamomu shliakhu zi skladnym reliefom / A.P. Kozhushko, O.L. Hryhoriev // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2018. – № 27 (1303). – P. 34 – 61

9. Kozhushko A.P. Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei prychipnykh ta napivprychipnykh tsystem u skladi mashynno-traktornoho ahrehatu / A.P. Kozhushko // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – № 5 (1330). – P. 34 – 40.

10. Kozhushko A.P. Otsinka enerhetychnoi skladovoi transportnoho zasobu z ahrehatamy pereminnoi masy za rakhunok dynamichnoho analizu vilnykh kolyvan / A.P. Kozhushko // *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Serii: Innovatsiini proekty v haluzi tekhnichnoho servisu mashyn.* – 2019. – № 201. – P. 217 – 228.

11. Kozhushko A.P. Doslidzhennia plavnosti rukhu mashynno-traktornoho ahrehatu z pereminnoi masoiu pry vykonanni transportnoi roboty / A.P. Kozhushko // *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii.* – 2019. – № 15. – P. 50 – 57.

12. Kozhushko A.P. Spektralni efekty ta teoremy pro vlastyvoli puchka symetrychnykh matryts v zadachakh dynamiky skladnykh mekhanichnykh system

/ A.P. Kozhushko, O.O. Naboka, O.L. Hryhoriev // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – № 8 (1333). – P. 214 – 223

13. Kozhushko A.P. Mathematical modeling of free liquid surface motion in transporting agricultural semitrailer tanks / A.P. Kozhushko, A.L. Grigoriev, B.I. Kalchenko // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – № 22 (1347). – P. 31 – 38.

14. Mamontov A. H. Formuvannia matematychnoi modeli dynamichnoi navantazhenosti khodovoi systemy kolisnoho traktora z napivprychipnym ahrehatom / A.H. Mamontov, A.P. Kozhushko, O.Iu. Rebrov // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – № 1. – P. 29 – 41.

15. Kozhushko A.P. Enerhetychnist systemy mashynno-traktornoho ahrehatu z pereminnoiu masoiu za staloho rukhu / A.P. Kozhushko // *Naukovyi zhurnal «Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky».* – 2019. – T. 30 (69). – Ch.2. – № 3. – P. 161 – 166.

16. Kozhushko A.P. Shliakhy zmeshennia vplyvu pozdovzhnykh kolyvan transportnoho zasobu z ahrehatamy pereminnoi masy / A.P. Kozhushko, S.S. Kravchenko, A.H. Mamontov, O.O. Bolzhalarskyi // *Dvyhately vnutrenneho shoranyia,* 2019. – № 2. – S. 59 – 65.

17. Kozhushko A.P. Metodyka eksperymentalnoho doslidzhennia vyznachennia dynamichnykh kharakterystyk pry rusi kolisnykh traktoriv z ahrehatamy zminnoi masy / A.P. Kozhushko, I.V. Koliesnik, V.V. Lupenko // *Naukove vydannia Derzhavnoho universytetu «Zhytomyrska Politekhnikha». Tekhnichna inzheneriia.* – 2019. – № 2 (84). – P. 21 – 28.

18. Kozhushko A.P. Spektralnyi analiz eksperymentalnykh danykh rukhu kolisnykh traktoriv z ahrehatamy zminnoi masy / A.P. Kozhushko // *Naukovyi zhurnal «Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky».*

– 2019. – Т. 30 (69). – Iss.2. – № 5. – P. 134 – 143.

19. Kozhushko A.P. Doslidzhennia dynamichnoi navantazhenosti khodovoi systemy kolisnogo traktora z ahrehatamy zminnoi masy / A.P. Kozhushko // *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Serii: Problemy nadiinosti mashyn.* – 2019. – № 205. – P. 159 – 172.

20. Kozhushko A.P. Eksperymentalni doslidzhennia erhonomichnykh vlastyvostei kolisnykh traktoriv z ahrehatamy zminnoi masy / A.P. Kozhushko // *Avtomobilnyi transport.* – 2019. – № 45. – P. 38 – 45.

21. Kozhushko A.P. Analiz vplyvu kolyvan ridkoho vantazhu v napivprychipnii tsystemi na pokaznyky rukhu kolisnogo traktora / A.P. Kozhushko, O.Yu. Rebrov, B.I. Kalchenko, A.H. Mamontov // *Scientific Journal «ScienceRise».* – 2019. – № 12 (65). – P. 16 – 19.

22. Kozhushko A.P. Doslidzhennia malykh poperechnykh kolyvan ahrehativ zminnoi masy / A.P. Kozhushko // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – № 1 (1355). – P. 33 – 43.

23. Rebrov O. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhushko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy, E. Kalinin, E. Holovina // *EUREKA: Physics and Engineering*, 2020. – № 4. – P. 90 – 100.

24. Kozhushko A.P. Vplyv pereminnoi masy ridkoho vantazhu na dynamichnu navantazhenist khodovoi systemy transportovanykh ahrehativ / A.P. Kozhushko // *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv.* – 2020. – № 21. – P. 75 – 86.

25. Kozhushko A.P. Osnovni pryntsypy matematychnoho modeliuvannia dynamiky transportuvannia ridkoho vantazhu ta doslidzhennia na parametrychnyi rezonans v umovakh pererozpodilu mas v tsystemi / A.P. Kozhushko, O.L. Hryhoriev // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Dynamika i mitsnist mashyn.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – № 1. – P. 13-30.

26. Kozhushko A.P. Analiz vplyvu parametrychnoho rezonansu na rukh traktornoj tsystemy pry transportuvanni ridkoho vantazhu/ A.P. Kozhushko, O.L. Hryhoriev // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Dynamika i mitsnist mashyn.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – № 2. – P. 57-66.

27. Kozhushko A.P. Eksperymentalne ta rozrakhunkove doslidzhennia zatukhan kolyvan ridyny v yemnosti z vilnoi poverkhneiu / A.P. Kozhushko // *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh.* – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2020. – № 1. – P. 31-48.

Publications which prove approbation of the dissertation materials:

28. Kozhushko A.P. Vyznachennia skladovykh syl, yaki diut na platformu tsystemy mashynno-traktornoho ahrehatu // *Wykonane na materialach Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Science, research, development #11. Technics and technology»*, Rotterdam (The Netherlands), 29.11.2018 – 30.11.2018 / Wydawca: Sp. Zo.o. «Diamond trading tour» – Warszawa, 2018. – 80 p.

29. Kozhushko A.P. Matematychni modeliuvannia transportnoi roboty mashynno-traktornym ahrehatom v umovakh pererozpodilu mas v tsystemi // *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2019*, 15-17 travnia 2019 r.: u 4 ch. Ch. I. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 368 p.

30. Kozhushko A.P., Hryhoriev O.L. Matematychni modeliuvannia rukhu vilnoi poverkhni ridyny v silskohospodarskykh tsystemakh // *Matematychni ta imitatsiine modeliuvannia system. MODS 2019 : tezy dopovidei Chotyrnadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 24 – 26 chervnia 2019 r. – Chernihiv : ChNTU, 2019. – 402 p.

31. Kozhushko A.P., Mamontov A.H. Osoblyvosti vykonannia transportnykh robit prychipnymy ta napivprychipnymy ahrehatamy u skladi mashynno-traktornoj tekhniki // *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Avtomobilnyi transport v ahrarnomu sektori: proektuvannia, dyzain*

ta tekhnolohichna ekspluatatsiia», 16 – 17 travnia 2019 roku. – Kharkiv: KhNTUSH, 2019. – 154 p.

32. Kozhushko A.P. Statystychnyi analiz eksperymentalnykh danykh pry vykonanni transportnoi roboty traktorom z tsystemoiu // *International scientific and practical conference «Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience»* Wloclawek, Republic of Poland, September 27 – 28, 2019. – Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2019. – 200 p.

33. Kozhushko A.P. Dynamichna navantazhenist khodovoi systemy kolisnoho traktora z ahrehatamy zminnoi masy // *Zbirnyk materialiv mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi konferentsii «Problemy nadiinosti mashyn» prysviachena pamiati akademika V.Ia. Anilovycha*, 12-13 lystopada 2019 roku. – Kharkiv: KhNTUSH, 2019. – 107 p.

34. Kozhushko A., Riezva K. Comparison a running smoothness of a wheeled tractor with a semitrailer tank or unit while driving on asphalt-concrete surface // *Proceedings of the 3rd annual conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions»*, 23 November 2019. – Talinn, Estonia, 2019 – P. 39 – 41.

35. Kozhushko A.P. Peredumovy do vynyknennia parametrychnoho rezonansu kolisnoho traktora pry transportuvanni ahrehativ pereminnoi masy // *Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ekspluatatsiina ta servisna inzheneriia»*. – Kharkiv: KhNTUSH, 2020. – 242 p.

Pratsi, yaki dodatkovo vidobrazhaiut naukovi rezultaty dysertatsii:

36. Kalchenko B.I. Rozvytok matematychnoi modeli kryvoliniinoho rukhu dvovisnoho avtomobilia / B.I. Kalchenko, O.V.Holovina, A.P. Kozhushko, S.V. Redchyts // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriia: *Transportne mashynobuduvannia*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 13 (1235). – P. 45 – 50.

37. Kozhushko A.P. Kolyvannia mekhanichnykh system v avtomobile- ta traktorobuduvanni: navchalnyi posibnyk / A.P. Kozhushko. – Kharkiv: FOP Panov A.M., 2018. – 316 c.

38. Kalchenko B.I. Doslidzhennia protsesu rozghonu mashynno-traktornoho ahrehatu z hidrokerovanoiu transmissiieiu pry vykonanni transportnoi roboty / B.I. Kalchenko, A.P. Kozhushko, Ye.S. Pelypenko, O.O. Yaryta // *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. – Kharkiv: KhNADU. – 2019. – № 85. – P. 14 – 21.

39. Patent Ukrainy na korysnu model 136382, MPK (2019.01), V 60 K 17/00. Transmissiia transportnogo zasobu / A.P. Kozhushko, B.I. Kalchenko; zaiavnyk ta patentoobladach NTU «KhPI» (Ukraina). – № u 2019 02822; zaiavl. 21.03.2019; opubl. 12.08.2019, Biul. № 15.

40. Patent Ukrainy na korysnu model 138508, MPK (2019.01), F 02 D 41/10. Sposib mikrokontrolernoho rehuliuвання chastoty obertannia kolinchastoho vala dyzelia / A.O. Prokhorenko, S.S. Kravchenko, D.S. Talanin, S.Iu. Bilyk, A.P. Kozhushko, I.V. Shuba; zaiavnyk ta patentoobladach A.O. Prokhorenko, S.S. Kravchenko, D.S. Talanin, S.Iu. Bilyk, A.P. Kozhushko, I.V. Shuba (Ukraina). – № u 2019 06158; zaiavl. 03.06.2019; opubl. 25.11.2019, Biul. № 22.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	24
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1 ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАКТОРІВ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ РІДИНИ З ВІЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ У ЦИСТЕРНІ	34
1.1 Транспортна робота колісних тракторів як невід’ємна складова в агропромисловому комплексі	34
1.2 Методи, які описують динамічні властивості об’єктів з рухливою масою	42
1.3 Коливальний рух складної механічної системи	47
1.4 Наукова проблема дослідження динаміки руху колісного трактора з цистернами	68
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1	76
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СКЛАДНОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ «ТРАКТОР – ЦИСТЕРНА»	78
2.1 Вибір напрямку дисертаційного дослідження та загальна структура роботи	78
2.2 Загальна концепція захисту водія від впливу низькочастотних коливань мас трактора при перевезенні цистерни з рідиною	82
2.3 Методологічні основи формалізації фізичної моделі збудження низькочастотних поверхневих коливань рідини	85
2.4 Методика визначення низькочастотних коливань в’язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею	95
2.5 Експериментальні дослідження вільних коливань рідини в ємності призматичної форми	108
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2	129

	22
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ ВИНΙΚАЮТЬ ПРИ ПРЯМОЛІНІЙНОМУ РУСІ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА З ЦИСТЕРНОЮ НА ТРАНСПОРТНИХ РОБОТАХ	131
3.1 Загальний принцип побудови лінеарізованої моделі механічної системи	132
3.2 Аналіз коливань колісного трактора з агрегатами для перевезення рідини у цистерні в поздовжньо-вертикальній площині	134
3.3 Вплив роботи гідравлічного змішувача при аналізі коливань в поздовжньо-вертикальній площині	159
3.4 Аналіз коливань колісного трактора з цистернами в поперечно-вертикальній площині	164
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3	174
РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПО ШЛЯХУ ЗІ СКЛАДНИМ РЕЛЬЄФОМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАКТОРА З ЦИСТЕРНОЮ	176
4.1 Нелінійна математична модель коливань рухомих вузлів машинно-тракторного агрегату з цистернами в поздовжньо-вертикальній площині	176
4.2 Оцінка параметричних коливань в поздовжньо-вертикальній площині руху машинно-тракторного агрегату з цистерною	203
4.3 Нелінійна математична модель коливань рухомих вузлів машинно-тракторного агрегату з цистернами в поперечно-вертикальній площині	216
4.4 Дослідження параметричних коливань в поперечно-вертикальній площині руху машинно-тракторного агрегату з цистерною	219
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4	223

	23
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЦИСТЕРН З РІДИНОЮ	225
5.1 Мета досліджень, прилади та обладнання	225
5.2 Аналіз даних отриманих в ході випробувань	233
5.3 Порівняння лінійних прискорень отриманих теоретичним та експериментальним шляхом	254
5.4 Дослідження ергономічних властивостей колісних тракторів з цистернами	258
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5	261
РОЗДІЛ 6 ВПЛИВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗБУРЮЮЧИХ СИЛ НА КОЛІСНИЙ ТРАКТОР ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ РІДКИХ ВАНТАЖІВ	262
6.1 Оцінка впливу збурюючих сил за критерієм плавності ходу колісного трактора	262
6.2 Баластування колісних тракторів як спосіб зниження дії збурювальних сил на транспортній роботі	278
6.3 Дослідження динамічної навантаженості ходових систем машинно-тракторного агрегату при транспортуванні рідких вантажів	283
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 6	294
ВИСНОВКИ	296
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	301
ДОДАТОК А Декремент загасання для парціального осцилятора, що залежить від амплітуди коливань	341
ДОДАТОК Б Спектральні явища та теореми про властивості пучка симетричних матриць	348
ДОДАТОК В Патенти	359
ДОДАТОК Д Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	362
ДОДАТОК Ж Список публікацій здобувача за темою дисертації	370